

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-202122

(43)Date of publication of application : 19.07.2002

(51)Int.Cl.

G01C 3/06

G01B 11/00

G01S 17/10

G06T 1/00

(21)Application number : 2001-000595

(71)Applicant : OLYMPUS OPTICAL CO LTD

(22)Date of filing : 05.01.2001

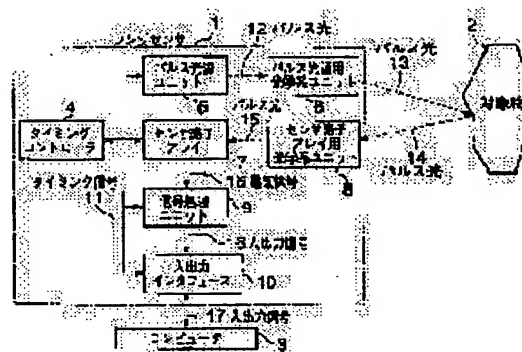
(72)Inventor : KOSAKA AKIO

## (54) CALIBRATION METHOD FOR TWO-DIMENSIONAL DISTANCE IMAGE SENSOR

## (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To provide a calibration method in which a distance according to the direction of the beam of light of each element can be measured precisely in a distance image sensor which uses a time-of-flight measuring principle and which comprises a plurality of two-dimensionally arranged elements.

**SOLUTION:** The calibration method for the distance image sensor which comprises a light receiving part containing the plurality of two-dimensionally arranged elements and which uses the time-of-flight measuring principle is provided with a step which finds a beam-of-light parameter prescribing the direction of the beam of light incident on each element and a step which finds a distance parameter up to an object according to the output signal of each element.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office



**【特許請求の範囲】**

**【請求項1】** 2次元に配置された複数の素子を含む受光部を有するタイムオブフライトの計測原理を利用した距離画像センサのキャリブレーション方法であり、上記各素子に入射する光線方向を規定する光線パラメータを求めるステップと、

上記各素子の出力信号に応じた対象物までの距離パラメータを求めるステップとを有することを特徴とする2次元距離画像センサのキャリブレーション方法。

**【請求項2】** 上記光線パラメータまたは距離パラメータを求めるにあたり、3次元形状が既知の部材を測定した結果を利用することを特徴とする請求項1記載の2次元距離画像センサのキャリブレーション方法。

**【請求項3】** 上記3次元形状が既知の部材の測定は、上記部材と上記2次元距離画像センサの距離を複数回変更して行われることを特徴とする請求項2記載の2次元距離画像センサのキャリブレーション方法。

**【請求項4】** 上記3次元形状が既知な部材は、複数の穴または凹凸のあるマーカを有する部材と、当該マーカを有さない平面部を有した部材とから構成されていることを特徴とする2次元距離画像センサのキャリブレーション方法。

**【請求項5】** 上記距離パラメータを求めるステップでは、変換テーブルを利用することを特徴とする請求項1記載の2次元距離画像センサのキャリブレーション方法。

**【請求項6】** 上記距離画像センサに加えて、形状が既知の部材を撮影するための撮影装置をさらに配置し、上記距離画像センサとこの撮影装置間の位置関係を規定するパラメータと、上記撮影装置に関するパラメータとを算出することを特徴とする請求項1記載の2次元距離画像センサのキャリブレーション方法。

**【請求項7】** 上記3次元形状が既知の部材を3次元的に移動させることにより、上記光線パラメータと上記距離パラメータとを算出することを特徴とする請求項2記載の2次元距離画像センサのキャリブレーション方法。

**【発明の詳細な説明】****【0001】**

**【発明の属する技術分野】** 本発明は、タイムオブフライト方式の距離画像センサのキャリブレーション方法に関する。

**【0002】**

**【従来の技術】** 3次元計測を行うことで距離画像を生成する距離画像センサとしては、文献1：R.Miyagawa and T.Kanade, "CCD-Based Range-Finding Sensor," IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.44, No.10, October 1997, pp.1648-1652がある。このセンサシステムでは、光源がパルス光を3次元形状を測定したい対象物に照射し、当該対象物から反射した光の遅延時間に関連する電荷量を2次元的に配置された光電素子を用いて

計測し、その電荷量と光の遅延時間の関係に基づき、対象物の3次元形状を測定することになる。实际的にこのような素子はCCDあるいはCMOSなどの微細素子から成り立ち、測定範囲を拡大するためには、こうしたCCDあるいはCMOSなどの素子と対象物の間にレンズなどの光学部品を配置することにより、カメラの画角に相当する測定領域を拡大する必要がある。従って、実際には光源から発せられるパルス光の位相差を算出して正確な形状計測あるいは距離計測を行うためには、光電素子の前方に配置された光学部品を含めて、各素子に対応する光線方向を決定する必要がある。

**【0003】**

**【発明が解決しようとする課題】** しかしながら、文献1に記載の距離画像センサは、基本的に1次元ラインセンサとして構成されており、しかも平面上のボードを利用してキャリブレーションを行うため、各素子に対応する光線方向を規定し、その光線方向における距離を算出するようにキャリブレーションされているわけではない。

**【0004】** 本発明はこのような課題に着目してなされたものであり、その目的とするところは、タイムオブフライトの計測原理を利用する2次元的に配置された複数の素子を有する距離画像センサにおいて、各素子の光線方向に応じた距離（レンジ）を正確に計測できるキャリブレーション方法を提供することにある。

**【0005】**

**【課題を解決するための手段】** 上記の目的を達成するために、第1の発明は、2次元に配置された複数の素子を含む受光部を有するタイムオブフライトの計測原理を利用した距離画像センサのキャリブレーション方法であり、上記各素子に入射する光線方向を規定する光線パラメータを求めるステップと、上記各素子の出力信号に応じた対象物までの距離パラメータを求めるステップとを有する。上記の構成は、以下に述べる第1実施形態に対応する。

**【0006】** また、第2の発明は、2次元距離画像センサのキャリブレーション方法において、上記光線パラメータまたは距離パラメータを求めるにあたり、3次元形状が既知の部材を測定した結果を利用する。上記の構成は、以下に述べる第1実施形態に対応する。

**【0007】** また、第3の発明は、第2の発明に係る2次元距離画像センサのキャリブレーション方法において、上記3次元形状が既知の部材の測定は、上記部材と上記2次元距離画像センサの距離を複数回変更して行われる。上記の構成は、以下に述べる第1実施形態に対応する。

**【0008】** また、第4の発明は、第3の発明に係る2次元距離画像センサのキャリブレーション方法において、上記3次元形状が既知な部材は、複数の穴または凹凸のあるマーカを有する部材と、当該マーカを有さない平面部を有した部材とから構成されている。上記の構成

は、以下に述べる第1実施形態に対応する。

【0009】また、第5の発明は、第1の発明に係る2次元距離画像センサのキャリブレーション方法において、上記距離パラメータを求めるステップでは、変換テーブルを利用する。上記の構成は、以下に述べる第1実施形態に対応する。

【0010】また、第6の発明は、第1の発明に係る2次元距離画像センサのキャリブレーション方法において、上記距離画像センサに加えて、形状が既知の部材を撮影するための撮影装置をさらに配置し、上記距離画像センサとこの撮影装置間の位置関係を規定するパラメータと、上記撮影装置に関するパラメータとを算出する。上記の構成は、以下に述べる第3実施形態に対応する。

【0011】また、第7の発明は、第2の発明に係る2次元距離画像センサのキャリブレーション方法において、上記3次元形状が既知の部材を3次元的に移動させることにより、上記光線パラメータと上記距離パラメータとを算出する。上記の構成は、以下に述べる第3実施形態に対応する。

#### 【0012】

【発明の実施の形態】〔第1の実施の形態〕図1は、本発明に関わる距離画像センサとしてのレンジセンサ1の装置構成の一部を示す図である。図1において、レンジセンサ1は、対象物2を撮影するために構成され、その入出力信号17はコンピュータ3に送信される。レンジセンサ1の基本コンポーネントとしては、レンジセンサ1の全体のタイミングを制御するタイミングコントローラ4、タイムオブフライト用のパルス光12を生成するパルス光源ユニット5、そのパルス光12を対象物2へ照射するためにパルス光13へ調節するパルス光源用光学系ユニット6、対象物2から反射されたパルス光14をセンサ素子アレイ7に結像するためのセンサ素子アレイ用光学系ユニット8、そのパルス光15を受光するセンサ素子アレイ7、タイミングコントローラ4が生成したパルス光とセンサ素子アレイ7が入力したパルス光との時間差のパルス光15を信号処理してコンピュータ3が入力可能な入出力信号16に変換する信号処理ユニット9、そのように処理された信号をコンピュータ3へ出力したり、コンピュータ3からの命令を入力したりする入出力インタフェース10から構成される。

【0013】タイミングコントローラ4は、コンピュータ3からの指令を入出力インタフェース10を介して受け取り、パルス光を発生するタイミング信号を発生するとともに、センサ素子アレイ7での電荷量をリセットや振り分けするためのタイミング信号を生成する。このセンサ素子アレイ7としては、文献1にあるようなCCD素子を利用したものや、CMOS素子を利用したものなどがあるが、その他の素子でも光遅延時間に関連する電荷量を蓄積できる素子であれば、どのような素子構造でも構わない。

【0014】センサ素子アレイ7のこうした光電変換素子では、タイミングコントローラ4の生成した信号を光電変換素子が受けた光の遅延した時間だけ、素子が電荷量を蓄積することにより（例えば2個のゲートを用いて振り分ける電荷量の差をとることにより、原理的には光の遅延時間に比例した値（あるいは光遅延時間を変数とするある関数系の値）を電気信号として送出することになる。

【0015】ただし本実施形態で説明するキャリブレーション方法に関しては、これらの素子は、光の遅延時間 $t$ の関数 $f(t)$ を電気信号として出力する素子であればよい。ここで $f(t)$ は $t$ に関する単調増加あるいは単調減少な関数であればよく、文献1で説明されている方法以外のものでも、このような特性を出力できればよいことを、ここでは述べておく。

【0016】以下、本発明で使用する数学的用語について説明する。図2は、センサ素子アレイ7の構造を数学的に示したものである。センサ素子アレイ7は、2次元状に均一的に分散していると仮定する（必ずしも、2次元的でなくてもよく1次元的でよい）。センサ素子は、 $(i, j)$ なるインデックスにより規定してあるものとする。ここで $i, j$ は整数で、 $i = 1, 2, \dots, N_i$ ;  $j = 1, 2, \dots, N_j$ である。このときパルス光源ユニット5から発せられる光パルスは、対象物2で反射し、レンジセンサ1内のセンサ素子アレイ用光学系8を通して結像された後に、センサ素子アレイ7 $(i, j)$ に到達する。パルス光が発せられてからセンサ素子アレイ7に到達するまでの時間を $t_{ij}$ 、センサ素子 $(i, j)$ の電荷量を $f_{ij}$ すると、 $f_{ij}$ は $f_{ij}(t_{ij})$ で $t_{ij}$ の関数である。もちろん $f_{ij}$ は素子特性の多少のばらつきの影響や、光源とセンサ素子間の相対的位置に依存するので $f_{ij}$ は $(i, j)$ に依存した関数である。

【0017】なお、本発明で算出される距離画像（レンジデータ）を生成するためのキャリブレーションパラメータは、上記信号処理ユニット9あるいはコンピュータ3に格納され、そのパラメータ値に基づいて、各センサ素子ユニットからの出力が、レンジデータへと変換される。ただし、本発明で述べられるキャリブレーションパラメータ自体を算出する（推定する）処理は、コンピュータ3などのデータ処理装置で行われる。

【0018】一方レンジセンサ1は、固有の基準座標系を有しており、いまこの座標系を $R(x_R, y_R, z_R)$ で表すことにする。本発明でいう所のレンジセンサ1のキャリブレーションは、センサ素子アレイ7内の各素子 $(i, j)$ の出力信号 $f_{ij}$ が与えられたとき、その $f_{ij}$ に対応する対象物2上の反射を起こした点のR座標系に関する座標値 $(x_R, y_R, z_R)$ を算出する算出方法と算出に関わるパラメータを推定することにある。

【0019】ここで、センサ素子アレイ7でのインデッ

クス (i, j) により、センサ素子アレイ上での物理的位置が確定されるばかりでなく、その物理的位置とセンサ素子アレイ用光学系ユニット8とが規定する光線方向を決定することができる。即ち各センサ素子アレイの素子 (i, j) に対してその素子と光学系の焦点とを結ぶ直線 (光線) 上に対象物上の反射点が存在しなければならない。すなわち、(i, j) に対して、固有な直線 L が R 座標系内で存在し、直線 L は R 座標系において一意に決定できるものである。従って、対象物上の反射点  $(x_R, y_R, z_R)$  は直線 L 上になければならないという制約条件と  $f_{ij}$  の値とを利用することにより、 $(x_R, y_R, z_R)$  を決定することができる。

【0020】以下の議論では、R座標系の定義として、このセンサ素子アレイ7に対応するように、R座標系を

$$\begin{aligned} i &= \alpha_u \frac{x_R}{z_R} + u_0 \\ j &= \alpha_v \frac{y_R}{z_R} + v_0 \end{aligned} \quad (1)$$

【0024】で表すことができる。ここで、 $(\alpha_u, \alpha_v)$  は i, j 方向の拡大率を表すパラメータであり、 $(u_0, v_0)$  は、(i, j) が規定するセンサアレイ面と光軸である  $z_R$  軸が公差する交点を表す。

$$u = \frac{i - u_0}{\alpha_u} \quad v = \frac{j - v_0}{\alpha_v} \quad (2)$$

で表されるセンサアレイ面での正規化を行ったのち、以下のような媒介変数  $(\bar{u}, \bar{v})$  を利用して関係式で表すことができる。(後にこのパラメータ  $(\bar{u}, \bar{v})$  を光線パラメータと命名することになる。)

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{x_R}{z_R} = u + (g_1 + g_3)u^2 + g_4uv + g_1v^2 + k_1u(u^2 + v^2) \\ \bar{v} &= \frac{y_R}{z_R} = v + g_2u^2 + g_3uv + (g_2 + g_4)v^2 + k_1v(u^2 + v^2) \end{aligned} \quad (3)$$

【0027】これらの定式化については、文献2 (J. Weing, P. Cohen, and M. Herniou, "Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.10, October 1992, pp.965-980.) で詳しく述べられているので、ここではその説明を省略する。

【0028】実際には、R座標系をレンジセンサ1外部から直接的に規定する (計測する) ことは困難であるの

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} + T \quad (4)$$

【0031】ここで、Rを規定するパラメータとしては Yaw( $\phi_1$ )-Pitch( $\phi_2$ )-Roll( $\phi_3$ )角などを利用することができ、並進ベクトルTとしては  $(t_1, t_2, t_3)$  を利用することができる。

定義するものとする。すなわちセンサ素子アレイ用光学系ユニット8の焦点位置をRの原点とし、センサ素子のインデックス i と平行に  $x_R$  軸を、インデックス j と平行に  $y_R$  軸を取ることにし、 $z_R$  軸はこれらに直交する方向にとることとする。

【0021】実際のところ、センサ素子アレイ用光学系ユニット8内には、光学系レンズが使用されることが多く、レンズのディストーションを含めた形で直線 (光線) L を決定することも重要な場合もある。

【0022】光学系のレンズディストーションが無視できる場合には、この (i, j) に対応する直線上の点  $(x_R, y_R, z_R)$  との関係は

【0023】

【数1】

【0025】レンズディストーションが無視できない場合には、式は複雑になるが、

【0026】

【数2】

で、この座標系とは別に基準座標系を設定して、その基準座標系とR座標系との関係を考えながら、レンジセンサ1のキャリブレーションを行うことが便利となる。

【0029】ここでは、この別の基準座標系として世界座標系W ( $x_1, y_1, z_1$ ) を考え、W座標系からR座標系への座標変換パラメータを回転行列Rと並進ベクトルTで表すすると、

【0030】

【数3】

$t_3$ ) を利用することができる。

【0032】すると、式 (3) は

【0033】

【数4】

$$\begin{aligned}\bar{u} &= \frac{r_{11}x_W + r_{12}y_W + r_{13}z_W + t_x}{r_{31}x_W + r_{32}y_W + r_{33}z_W + t_z} \\ &= u + (g_1 + g_3)u^2 + g_4uv + g_1v^2 + k_1u(u^2 + v^2) \\ \bar{v} &= \frac{r_{21}x_W + r_{22}y_W + r_{23}z_W + t_y}{r_{31}x_W + r_{32}y_W + r_{33}z_W + t_z} \\ &= v + g_2u^2 + g_3uv + (g_2 + g_4)v^2 + k_1v(u^2 + v^2)\end{aligned}\quad (5)$$

【0034】で表すことができる $s = (\alpha_0, \alpha_1, u_0, v_0; k_1, g_1, g_2, g_3, g_4)$ をカメラ内部パラメータ、 $e = (\phi_1, \phi_r, \phi_z; t_1, t_r, t_z)$ をカメラ外部パラメータと呼ぶことにする。ここ

【0035】

【数5】

$$\begin{aligned}R &= \text{Rot}(x, \phi_x) \text{Rot}(y, \phi_y) \text{Rot}(z, \phi_z) = \\ &\begin{bmatrix} \cos \phi_z & -\sin \phi_z & 0 \\ \sin \phi_z & \cos \phi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_y & 0 & \sin \phi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi_y & 0 & \cos \phi_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_x & -\sin \phi_x \\ 0 & \sin \phi_x & \cos \phi_x \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (6)$$

【0036】で表される。

【0037】従って、より現実的なキャリブレーションとしては、こうしたパラメータ群 $p = (\phi_1, \phi_r, \phi_z; t_1, t_r, t_z; \alpha_0, \alpha_1, u_0, v_0; k_1, g_1, g_2, g_3, g_4)$ を推定することにより、キャリブレーションを行うことを、今後考える。

【0038】キャリブレーションの具体的方法を説明する前に、まず光学系の内部パラメータ $s = (\alpha_0, \alpha_1, u_0, v_0; k_1, g_1, g_2, g_3, g_4)$ と外部パラメータ $e = (\phi_1, \phi_r, \phi_z; t_1, t_r, t_z)$ が既知であると仮定したときに、レンジセンサ1によりどのようにして距離画像を生成できるかについて

説明する。

【0039】図3に示されるように、いま世界座標系 $W$ で $z_1 = z_n$ なる基準平面板18 ( $m = 1, 2, \dots, N$ )を用意し、この平面板にパルス光をあてたときに、各素子 $(i, j)$ が出力する信号を $f_{ij}$ とする。先ず各素子 $(i, j)$ は規定する光線と $z_1 = z_n$ の基準平面板との交点をレンジセンサ座標系で求める。これには、 $(i, j)$ に関する光線を、式(2)を用いて $(i, j)$ に関して

【0040】

【数6】

$$x_R = \bar{u} z_R \quad y_R = \bar{v} z_R \quad (7)$$

とすると、 $(\bar{u}, \bar{v})$ は以下のようにして算出可能である。すなわち

$$\begin{bmatrix} \bar{u} z_R \\ \bar{v} z_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} + T \quad (8)$$

【0041】をみたと $z_R$ を算出する。ここで注意すべきは、基準平面板上では $z_1$ は既知(設定した値)であるので、この方程式での未知数は $z_R, x_1, y_1$ の3個である。一方、方程式の制約次数も3であるので、解

は存在する。式(8)から、

【0042】

【数7】

$$\begin{bmatrix} z_R \\ \bar{u} \\ \bar{v} \\ 1 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} + T \quad (9)$$

を導き、この式(9)から

$$\Lambda \begin{bmatrix} z_R \\ x_W \\ y_W \end{bmatrix} = b \quad (10)$$

【0043】で表される線形方程式を導き、かつ解法することにより、 $z_R$ を算出することができる。ここで、

【0044】  
【数8】

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \bar{u} & -r_{11} & -r_{12} \\ \bar{v} & -r_{21} & -r_{22} \\ 1 & -r_{31} & -r_{32} \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} t_x + r_{13}z_W \\ t_y + r_{23}z_W \\ t_z + r_{33}z_W \end{bmatrix} \quad (11)$$

であり、 $z_R$ は、

$$\begin{bmatrix} z_R \\ x_W \\ y_W \end{bmatrix} = \Lambda^{-1}b \quad (12)$$

から算出することができるわけである。続いて  $z_R$  が求まると、

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{u} z_R \\ \bar{v} z_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-u_0}{\alpha_u} z_R \\ \frac{j-v_0}{\alpha_v} z_R \\ z_R \end{bmatrix} \quad (13)$$

により、基準平面上の基準点 ( $x_R, y_R, z_R$ ) を算出することができる。そこで、各素子 ( $i, j$ ) に対して、 $(\bar{u}, \bar{v})$  のことを光線方向を規定する光線パラメータと命名して、以下の議論を行う。

【0045】このようにして、センサ素子の出力  $f_{ij}$  に対するR座標系に関する反射点 ( $x_R, y_R, z_R$ ) を測定値として得ることができる。

【0046】各素子 ( $i, j$ ) に対して、異なった基準平面の位置  $m$  に対する反射点 ( $x_{R^m}, y_{R^m}, z_{R^m}$ ) とセンサ出力信号  $f_m$  が与えられたとすると、これらを利用して、任意の出力信号  $f$  に対する3次元位置 ( $x_R, y_R, z_R$ ) を計算することができる。例えば、図4に示されているように、測定点列 ( $f_m, z_{R^m}$ ) に対するルックアップテーブルを変換テーブルとして用意しておく。このとき  $z_{R^m}$  と  $z_{R^{m+1}}$  の間隔は、部分的に線形近似できる程度に十分小さいと仮定する。このとき、任意の出力信号  $f$  に対する  $z_R$  を、以下の方法で算出することができる。すなわち任意の出力信号  $f$  が与えられたとき、

【0047】

【数9】

(1)  $f^m \leq f \leq f^{m+1}$  をみたす  $m$  を見つける。

$$(2) z_R = \frac{(f^{m+1} - f) z_{R^m} + (f - f^m) z_{R^{m+1}}}{f^{m+1} - f^m}$$

【0048】で  $z_R$  を算出することができる。このようにして  $z_R$  を算出したら、式(13)によりレンジセンサ座標系での3次元位置を算出することができる。

【0049】いままで説明してきた方法は、一般的にルックアップテーブル方式の距離データ算出方法である。いままでの説明では、ルックアップテーブル処理を部分線形近似処理により行ってきたが、もちろんスプライン方式などの非線形近似であっても構わない。さらにテーブルを作成する際に  $f_m$  を繰り返し測定し、その測定値の代表値 (例えばメディアンや平均値) を算出することにより、 $f_m$  に含まれたノイズを減少させることも可能である。以下での議論では、このルックアップテーブル



を作成するのに必要な測定パラメータ群 ( $f_{ij}$ ,  $z_{ij}$ )  
( $m=1, 2, \dots, N_i$ ) を距離パラメータと呼ぶこと  
にする。

【0050】

【数10】

いままで説明して数学的な方法により、各素子に ( $i, j$ ) に対して、  
光線方向を規定する光線パラメータ ( $u_{ij}$ ,  $v_{ij}$ ) と距離を規定する距離パ  
ラメータ ( $f_{ij}$ ,  $z_{ij}$ ) を決定できれば、レンジセンサとして、レンジ  
センサ座標系 R を基準として距離計測 (形状計測) を行うことができ  
ることを説明してきた。

【0051】以下では、こうした光線パラメータと距離  
パラメータをどのようにして算出するかについて実施形  
態を利用しながら説明する。

【0052】図5は、キャリブレーション方法を具体化  
するアルゴリズムを示す図である。ステップ1は、各素  
子 ( $i, j$ ) に対する光線方向を規定する光線パラメ  
ータと座標変換パラメータを算出するものであり、ステッ  
プ2では、距離に関するルックアップテーブルを規定す  
るための距離パラメータの算出とルックアップテーブル  
を作成するステップである。

#### 【0053】ステップ1

図6は、光線パラメータと座標変換パラメータを算出  
する方法を実現する装置を示す図である。レンジセンサ1  
は平行レール19上に配置され、キャリブレーションボ  
ード20も平行レール19上に配置されている。平行レ  
ール19とキャリブレーションボード20は世界座標系  
で定義されるものであり、キャリブレーションボード2  
0は、平行レール19上で世界座標系で平行レール19  
に平行に移動可能なものとなっている。ここでは説明を  
簡単にするために、平行レール19は世界座標系の  $z$  軸  
と平行に移動できるものと仮定する。すなわちキャリブ  
レーションボード20は、 $z_i = z_k$  で示される位置に  
配置することができるものとする。

【0054】図7はキャリブレーションボード20の構  
成を示す図である。キャリブレーションボード20内  
には、マーカとしての大円の穴と小円の穴のキャリブレ  
ーションパターンが存在する。マーカを有していない部分  
は白色の平面部から構成される。大円5個は、キャリブ  
レーションパターンの同定を容易にするために世界座標  
系での  $x$  方向及び  $y$  方向に対して対称の位置に配置され

ており、すべての穴 (パターン) の世界座標系での位置  
はあらかじめ算出が可能となっている。すべての穴の個  
数を  $N_k$  とすると、これらの穴の世界座標系での中心位  
置は、( $x_k, y_k, z_k$ ) ( $k=1, 2, \dots, N_k$ )  
と表すことができる。もちろん穴の数に比べて、センサ  
素子数は十分大きいと仮定する。

【0055】図8は、光線パラメータを算出するための  
アルゴリズムを示す図である。ステップ1-1では、全  
体の流れをコントロールするインデックスパラメータ  $k$   
を1で初期化する。このパラメータは、キャリブレーシ  
ョンボード20を配置する位置を指定するパラメータで  
ある。ステップ1-2では、世界座標系の  $z_i = z_k$  の  
位置にキャリブレーションボード20を配置する。ステ  
ップ1-3では、レンジセンサ1でキャリブレーション  
ボード20を撮影し、各素子からの信号出力  $f_{ijk}$  を入  
力する。ステップ1-4では、 $f_{ijk}$  を2次元配列とし  
て解析し、パターンを抽出するとともに同定し、キャリ  
ブレーションパターンの穴の位置の中心 ( $u_k, v_k$ )  
を計算する。ステップ1-5では、抽出、同定されたパ  
ターンの世界座標系における3次元位置 ( $x_k, y_k,$   
 $z_k$ ) を2次元位置 ( $u_k, v_k$ ) とともに登録する。  
ステップ1-6では、 $k$  の値を1増やす。ステップ1-  
7では、インデックス  $k$  があらかじめ定められた  $N_k$  より  
大きいかなを否かをチェックする。もし大きくなけれ  
ば、ステップ1-2へ移行する。大きければ、ステップ  
1-8へ移行する。ステップ1-8では、ステップ1-  
5で登録された3次元位置 ( $x_k, y_k, z_k$ ) を2次  
元位置 ( $u_k, v_k$ ) を利用して、

【0056】

【数11】

各素子 ( $i, j$ ) に対する光線パラメータ ( $u_{ij}$ ,  $v_{ij}$ ) と世界座標系  
からレンジセンサ座標系への座標変換パラメータ (カメラ外部パラメ  
ータ)  $R, T$  を算出する。

【0057】以下、本アルゴリズムでより詳細な説明が  
必要なステップ1-4, ステップ1-8について説明す  
る。

#### 【0058】ステップ1-4

例えば、センサ素子数を  $N_i \times N_j$  個とし、各素子が出  
力する信号  $f_{ij}$  で表す。このとき、 $f_{ij}$  は、キャリブ  
レーションボード20内の穴を光線方向とすると、異常

値として認識され、穴以外を光線方向とするときには、  
キャリブレーションボード20からの反射に関連する正  
常値を送出することになる。従って、センサ素子アレイ  
の全体の出力は  $f_{ij}$  の2次元配列として定義することが  
できる。またキャリブレーションボード20で穴を有さ  
ない平面部で反射された光線は素子 ( $i, j$ ) の近傍  
( $i+1, j$ )、( $i-1, j$ )、( $i, j-1$ )、

( $i, j+1$ )などで正常の値を示すことになる。従って、 $f_{ij}$ が形成する2次元配列の値を解析することにより、穴の中心位置を求めることができる。こうした手法は、画像処理における2次元連結領域の抽出およびその方法でよく用いられる方法であるので、ここではその方法についての説明を省略する。ここで注意すべきことは、キャリブレーションボード20上には、大小の穴が存在するが、はじめに大円の方を見つけ出すことにより、 $f_{ij}$ 2次元配列上での穴の同定を容易に行うことができる。

ステップ1-7までで抽出されたパターンの2次元位置 ( $u_a^k, v_a^k$ ) と3次元位置 ( $x_a^k, y_a^k, z_a^k$ ) が得られた後、これらから各素子 ( $i, j$ ) に対する光線パラメータ ( $u_{ij}, v_{ij}$ ) と世界座標系からレンジセンサ座標系への座標変換パラメータ (カメラ外部パラメータ)  $R, T$  を算出する。

【0061】本ステップでは、まずステップ1-7までで得られた2次元座標値と3次元座標値の対を統合する。具体的には、すべての測定点对を並べ替えて、( $u_b, v_b, x_b, y_b, z_b$ ) というコンパクトな形で表す。ここでインデックスの  $b$  は、これまで使用した  $a, k$  のインデックスを統合したものであり、全ての測

【0059】このようにすることで、キャリブレーションパターン ( $a=1, 2, \dots, N_a$ ) に対する2次元配列上での位置 ( $u_a, v_a$ ) を求め、ステップ1-5では、その世界座標系での位置 ( $x_a, y_a, z_a$ ) を求めることができる。ここで ( $u_a, v_a$ ) は必ずしも格子点 (整数値) ではない、すなわち実数であることもあり得ることも付しておく。

【0060】ステップ1-8  
【数12】

定点を1つのインデックスで表したものである。ここで  $b=1, 2, \dots, N_b$  であるとする。ステップ1-8では、これら ( $u_b, v_b, x_b, y_b, z_b$ ) を用いて、

【0062】  
【数13】

各素子に関する光線パラメータ ( $u_{ij}, v_{ij}$ ) と外部パラメータ  $R, T$  を算出する方法であるが、本方式は、画像処理におけるカメラキャリブレーションの問題と等価となる。

【0063】この方法に関しては文献2に詳しく述べられているので詳しく説明しないが、カメラキャリブレーションの方法では、カメラ内部パラメータのうちピンホールに関わるパラメータ ( $\alpha_u, \alpha_v, u_0, v_0$ ) と、レンズのディストーションのパラメータ ( $k_1, g_1, g_2, g_3, g_4$ )、さらにカメラ外部パラメータに関わる ( $\phi_1, \phi_2, \phi_3; t_1, t_2, t_3$ ) を同時に算出する方法である。

【0064】  
【数14】

これらのパラメータが算出されると、各素子に関わる光線パラメータ ( $u_{ij}, v_{ij}$ ) は、媒介変数 ( $u_{ij}, v_{ij}$ ) を利用しながら、以下のよう

$$u_{ij} = \frac{1 - u_0}{\alpha_u} \quad v_{ij} = \frac{j - v_0}{\alpha_v} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \bar{u}_{ij} = & u_{ij} + (g_1 + g_3) u_{ij}^2 + g_4 u_{ij} v_{ij} \\ & + g_1 v_{ij}^2 + k_1 u_{ij} (u_{ij}^2 + v_{ij}^2) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_{ij} = & v_{ij} + g_2 u_{ij}^2 + g_3 u_{ij} v_{ij} \\ & + (g_2 + g_4) v_{ij}^2 + k_1 v_{ij} (u_{ij}^2 + v_{ij}^2) \end{aligned}$$

これらが ( $\bar{u}_{ij}, \bar{v}_{ij}$ ) となるわけであり、光線パラメータ ( $\bar{u}_{ij}, \bar{v}_{ij}$ ) と世界座標系からレンジセンサ座標系への座標変換パラメータ  $R, T$  を算出することができることになる。

【0065】ステップ2

図9は、ステップ2である距離パラメータの算出とルッ

クアップテーブルの作成に関する装置を示す図である。レンジセンサ1は、ステップ1と同様に、平行レール19上に装着される。平行レール19には、さらに平面のホワイトボード21が設置されている。この平面のホワイトボード21は、ステップ1のキャリブレーションボード20と同様に、平行に移動可能であり世界座標系の $z$ 位置が $z_1 = z_0$ となるように配置可能となっている。いまホワイトボード21の移動位置を $z_1 = z_1, z_2, \dots, z_{N_1}$ とする。

【0066】図10は、ステップ2のアルゴリズムの詳細を示す図である。ステップ2-1では、本アルゴリズムで使用するインデックス $m$ の初期値として1が代入さ

れる。ステップ2-2では、世界座標系で $z_1 = z_0$ の位置にホワイトボード21を設置する。ステップ2-3では、レンジセンサ1からパルス光を照射し、ホワイトボード21で反射したパルス光がレンジセンサ1の各素子 $(i, j)$ で変換されて得られた信号を出力信号 $f_{ij}$ として記録する。ステップ2-4では、 $m$ の値を1増加する。ステップ2-5では、 $m$ と $N_1$ を比較し、もし $m$ が $N_1$ より大きくなければ、ステップ2-2に移行する。そうでなければ、ステップ2-6に移行する。

【0067】

【数15】

ステップ2-6では、ステップ1で算出した各素子の光線パラメータ $(\bar{u}_{1j}, \bar{v}_{1j})$ と座標変換パラメータ $R, T$ と $(e_{1j}^m, z_{1j}^m)$ を利用して、各素子に関する $(e_{1j}^m, z_{1j}^m)$ を算出し、その後に各素子に関するルックアップテーブルを算出することになる。

【0068】ここでは、本アルゴリズムで重要となるステップ2-6に関して説明する。

【0069】ステップ2-6

【数16】

ステップ1で算出した各素子の光線パラメータ $(\bar{u}_{1j}, \bar{v}_{1j})$ と座標変換パラメータ $R, T$ と $(e_{1j}^m, z_{1j}^m)$ を利用して、各素子に関する $(e_{1j}^m, z_{1j}^m)$ を算出する方法について、まず説明する。このためには、式(7)から式(13)を利用して、 $z_{1j}^m$ を計算すればよい。具体的には、式(7)から式(13)の中の $(\bar{u}, \bar{v})$ に $(\bar{u}_{1j}, \bar{v}_{1j})$ を代入することにより求める。

【0070】こうして求められた $(f_{ij}, z_{ij})$ を、図11に示されるようなテーブルとして作成することとなる。このように作成されたテーブルを利用すれば、先に説明した方法で、レンジセンサ座標系における距離計

測を行うことができるようになるわけである。

【0071】

【数17】

以上説明してきた方法では、レンジセンサを構成する各素子 $(i, j)$ に対する光線パラメータ $(\bar{u}_{1j}, \bar{v}_{1j})$ と距離パラメータ $(e_{1j}^m, z_{1j}^m)$

を算出することができる。このような方法を採用することにより、

【0072】(1) 各素子の特性のばらつきを補正し、(2) レンジセンサ1内に配置された光学系ユニットのディストーション補正も行うこともでき、タイムオフライトを計測原理とする2次元素子構造を有するレンジセンサ1でも、正確に3次元計測を実現するキャリブレーション方法を提供することができる。

【0073】今まで説明してきた方法では、図7に示すようなキャリブレーションボード20を複数個の $z$ 位置に配置して行った。もちろんこのキャリブレーションボード20には、いくつかのバリエーションを考えることができる。

【0074】例えば、図12に示すように、 $z$ の位置に応じてキャリブレーションボード20内のパターンの大きさと間隔を変化されたボードを複数用意しておいても

構わない。この図12に示すようなキャリブレーションボード20では、レンジセンサ1の予想画角をまず想定し、その予想画角で、センサ素子面にいつもほぼ同じようなサイズでパターンが抽出できるようにするわけである。このように、レンジセンサ1の画角を配慮しながらパターンの大きさと間隔を設計することで、素子アレイ $(i, j)$ 内での穴の大きさがほぼ一定となり、その抽出がより容易になるとともに穴の検出能力も向上させることができる。

【0075】また、今までの説明では、キャリブレーションボードやホワイトボードを移動して $z_w = z_0$ または $z_w = z_m$ なる位置を設定したが、これらのボードを固定して、レンジセンサ1を相対的に移動する方法を採用しても同様の効果が得られるのは明白である。

【0076】〔第2の実施の形態〕第1の実施形態では、アレイ内の素子数がキャリブレーションボード内のパターン（穴）の個数に比べて、大きい場合には有効である。ところがアレイ内の素子数が極端に小さい場合には、穴の中心を計測する精度が落ちることが考えられる。このような場合にも対処できる方法が、本第2の実施形態で説明する方法である。図13は、第2の実施形態を実現する装置構成を示す図である。図において、レンジセンサ1は、世界座標系で固定されており、キャリブレーションボード22は、1個の円形の穴を有するホワイトボードから成り立つ。このキャリブレーションボード22は、Xステージ23、Yステージ24、Zス

テージ25の上に装着されている。これらのXステージ23、Yステージ24、Zステージ25は、コンピュータ3により生成されるコントロール信号26を利用することにより、キャリブレーションボード22内の穴の中心位置を世界座標系の任意の位置に移動できるように制御されている。より具体的には、キャリブレーションボード22内の穴の中心位置をあらかじめ定められた複数の $(x_1, y_1, z_1)$ にできるようになっている。すなわち、 $x, y, z$ 方向で、

【0077】

【数18】

$$\begin{aligned} x_w &= x^1, x^2, x^3, \dots, x^{N_x} \\ y_w &= y^1, y^2, y^3, \dots, y^{N_y} \\ z_w &= z^1, z^2, z^3, \dots, z^{N_z} \end{aligned} \quad (16)$$

【0078】の組み合わせの位置に移動することが可能となっている。

【0079】図14は、アルゴリズムのステップを示すフローチャートである。ステップ3-1では、世界座標系における $z$ の座標値を $z_1 = z_k$ とするところにキャリブレーションパターンの穴の中心の $z$ 座標にあわせるように、Zステージによりキャリブレーションボード22を移動する。ステップ3-2では、あらかじめ設定された $x_1 = x_k, y_1 = y_k$ の位置にキャリブレーションパターンである穴の中心が来るように移動する。ステップ3-1と3-2で、穴の中心は $(x_k, y_k, z_k)$ の位置になるようにできるわけである。

【0080】ステップ3-4では、レンジセンサ1からバルス光を発し、キャリブレーションボード22からの反射光をセンサ素子アレイで入力し、その結果 $f_{ijk}$ を出力する。これは、第1の実施形態で説明したのと同様である。ステップ3-4では、 $f_{ijk}$ で構成される2次元アレイ内から穴パターンを抽出する。この抽出方法も、第1の実施形態と同様である。こうして抽出された穴の中心位置を $(u_k, v_k)$ とする。またこの位置に対応する世界座標系での穴の中心3次元位置 $(x_k, y_k, z_k)$ として登録する。

【0081】

【数19】

また $\varepsilon_{ij}^k$ から穴に対応しなかったと判定された素子 $(i, j)$ に関しては、その値を $\bar{\varepsilon}_{ij}^k$ として、距離 $x_w = x^k$ の距離パラメータを後のステップで算出されるデータとして登録する。すなわち、第1の実施形態のステップ2で使用されたホワイトボードを使用せずに、 $\varepsilon_{ij}^k$ の値を登録するわけである。一方この時点で、他の $x_w = x^m$ と $y_w = y^n$ の組み合わせで、すでに $\bar{\varepsilon}_{ij}^k$ が登録されている場合には、今回測定された $\varepsilon_{ij}^k$ の値とすでに登録されている $\bar{\varepsilon}_{ij}^k$ とを比較して、 $\bar{\varepsilon}_{ij}^k$ の更新を行う。この更新方法としては、 $\varepsilon_{ij}^k$ と $\bar{\varepsilon}_{ij}^k$ がある閾値より小さく、ノイズ成分による悪影響が少ないと判定される場合には、いままでに更新に利用した回数 $c$ を利用して、

$$\bar{\varepsilon}_{ij}^k \leftarrow \frac{c}{c+1} \bar{\varepsilon}_{ij}^k + \frac{1}{c+1} \varepsilon_{ij}^k \quad (17)$$

【0082】で平均化することにより、すなわち有効な測定値の平均値をとることにより、より正確な測定を行うわけである。

【0083】ステップ3-5、3-6では、それぞれXステージとZステージで所定の回数分に移動が終了し

たかを確認する。もし終了していないならば、それぞれステップ3-2あるいはステップ3-1へ移行する。そうでない場合には次ステップ3-7へと進む。

【0084】

【数20】

ステップ3-7では、先のステップで測定された  
 $(u_a, v_a, x_a, y_a, z_a)$  を利用することにより、光線パラメータ  
 $(\bar{u}_{1j}, \bar{v}_{1j})$  と座標変換パラメータ  $(R, T)$  を算出する。この方法は、

第1の実施形態で説明したとおりである。

ステップ3-8では、ステップ3-7で算出された光線パラメータ  
 $(\bar{u}_{1j}, \bar{v}_{1j})$  と座標変換パラメータ  $(R, T)$ 、さらにステップ3-4で  
測定された  $\bar{x}_{1j}^k$  を利用して、距離パラメータ  $(\bar{x}_{1j}^k, \bar{z}_R^k)$  を算出する。

そして、距離計測に必要なルックアップテーブルを作成するわけである。

この方法も第1の実施形態と同様である。

【0085】今までは、平面上に穴の空いたキャリブレーションボード22を利用して説明してきたが、このほかにもいろいろバリエーションを考えることができる。図15はその1例を示している。図15のように、キャリブレーションボード22の代わりに、3次元形状が既知な部材をリファレンス部材26として考えることができる。この例では、平面E上に4個の3角形平面A, B, C, Dを配置し、これら平面は1点で交わるものとする。

【0086】このリファレンス部材26を、キャリブレーションボード22の代わりに利用し、XYZステージで移動しながら、平面A, B, C, Dの交点位置としてのキャリブレーションの中心  $(u_s, v_s)$  を、 $f_{ijk}$  から抽出する。一方  $(x_s, y_s, z_s)$  は、XYZステージの移動量から算出することができる。ここで、 $f_{ijk}$  から交点位置  $(u_s, v_s)$  を算出する方法としては、 $f_{ijk}$  の近傍計算から  $f_{ijk}$  の値に複数の平面フィッティングを行い、抽出された平面方程式の交点を求めることにより、行えばよい。

【0087】以上説明してきたように、第2の実施形態では、XYZステージを利用して、光線パラメータと距離パラメータを同時に推定することが可能である。第1の実施形態で使用したセンサ素子アレイより小さな素子数のアレイでも、キャリブレーションが可能となる。さらに、第1の実施形態のステップ1とステップ2を統合することが可能であり、キャリブレーションの自動化にも適した方法である。

【0088】[第3の実施の形態] いままでの第1及び第2の実施形態では、レンジセンサ1のキャリブレーション方法を示した。一方、現実の場面の多くでは、レンジセンサ1が計測する距離画像と通常のCCD/CMOSカメラから得られるテクスチャ画像(カラーあるいはモノクロ画像)を融合して、テクスチャ画像を距離画像上にマッピングすること(あるいはその逆にテクスチャ画像に距離画像をマッピングすること)が求められることが多い。

【0089】以下、この方法について説明する。図16は、第3の実施形態の構成を示す図である。装置の構成は、ほとんど第1の実施形態と同様だが、これらにテク

スチャを撮影するためのテクスチャ撮影用カメラ(撮像装置)27がレンジセンサ1に装着される。

【0090】図17は、本実施形態の処理フローを示すフローチャートである。基本的には、図8に示される処理フローにステップ4-6とステップ4-9が新たに加わったものであり、これらはテクスチャ撮影用カメラのキャリブレーションパラメータ(光線パラメータと座標変換パラメータ)を算出するためのステップである。

【0091】ステップ4-1では、全体の流れをコントロールするインデックスパラメータkを1で初期化する。このパラメータは、キャリブレーションボードを配置する位置を指定するパラメータである。ステップ4-2では、世界座標系の  $z_k = z_k$  の位置にキャリブレーションボードを配置する。ステップ4-3では、レンジセンサ1でキャリブレーションボードを撮影し、各素子からの信号出力  $f_{ijk}$  を入力する。ステップ4-4では、 $f_{ijk}$  を2次元配列として解析し、パターンを抽出するとともに同定し、キャリブレーションパターンの穴の位置の中心  $(u_k, v_k)$  を計算する。ステップ4-5では、レンジセンサ1で抽出、同定されたパターンの世界座標系における3次元位置  $(x_k, y_k, z_k)$  を2次元位置  $(u_k, v_k)$  とともに登録する。

【0092】ステップ4-6では、テクスチャ撮影用カメラで、キャリブレーションパターンを撮影し、その撮影された画像内からキャリブレーションパターンの穴の中心を計測する。この穴の画像内での位置を  $(u_k, v_k)$  とする。一方この抽出された穴に対応するパターンの世界座標系における3次元位置  $(x_k, y_k, z_k)$  を、2次元位置  $(u_k, v_k)$  とともに登録する。

【0093】ステップ4-7では、kの値を1増やす。ステップ4-8では、インデックスkがあらかじめ定められた  $N_k$  より大きいかなかをチェックする。もし小さくなければ、ステップ4-2へ移行する。大きければ、ステップ4-9へ移行する。ステップ4-9では、ステップ4-5で登録された3次元位置  $(x_k, y_k, z_k)$  と2次元位置  $(u_k, v_k)$  を利用して、

【0094】

【数21】

各素子  $(i, j)$  に対する光線パラメータ  $(\bar{u}_{ij}, \bar{v}_{ij})$  と世界座標系からレンジセンサ座標系への座標変換パラメータ (カメラ外部パラメータ)  $R, T$  を算出する。

【0095】さらにステップ4-10では、ステップ4-6で登録されたテクスチャ撮影用カメラの3次元位置  $(x_c, y_c, z_c)$  と2次元位置  $(u_c, v_c)$  を利用して、テクスチャ撮影用カメラ内部パラメータと世界座標系からテクスチャ撮影用カメラ座標系への座標変換パラメータ (カメラ外部パラメータ)  $R', T'$  とレンジセンサ座標系からテクスチャ撮影用カメラ座標系への座標変換パラメータ  $H_i$  を算出する。

【0096】以下、本アルゴリズムにより詳細な説明が

必要なカメラキャリブレーションの方法と、ステップ4-6, ステップ4-10について説明する。

【0097】まずカメラキャリブレーションで必要となる数学について説明する。テクスチャ撮影用カメラの座標系  $C$  と世界座標系  $W$  を規定し、この世界座標系  $W$  での3次元位置  $(x_1, y_1, z_1)$  がカメラ画像内の位置  $(s, t)$  に対応すると仮定すると、

【0098】

【数22】

$$\hat{s} = \frac{s - s_0}{\beta_s} \quad \hat{t} = \frac{t - t_0}{\beta_t} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \hat{s} &= \frac{x'_{11}x_w + x'_{12}y_w + x'_{13}z_w + t'_x}{x'_{31}x_w + x'_{32}y_w + x'_{33}z_w + t'_z} \\ &\approx \hat{s} + (b_1 + b_3)\hat{s}^2 + b_4\hat{s}\hat{t} + b_1\hat{t}^2 + a_1\hat{s}(\hat{s}^2 + \hat{t}^2) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \hat{t} &= \frac{x'_{21}x_w + x'_{22}y_w + x'_{23}z_w + t'_y}{x'_{31}x_w + x'_{32}y_w + x'_{33}z_w + t'_z} \\ &\approx \hat{t} + b_2\hat{s}^2 + b_3\hat{s}\hat{t} + (b_2 + b_4)\hat{t}^2 + a_1\hat{t}(\hat{s}^2 + \hat{t}^2) \end{aligned}$$

【0099】の関係が成り立つ。

【0100】ここに  $R' = (\psi_1, \psi_2, \psi_3) = (r_{ij}')$  と  $t' = (t'_1, t'_2, t'_3)$  は、それぞれ世界座標系からテクスチャ撮影用カメラ座標系への座標変換のうちの回転行列成分と並進ベクトル成分を表す。 $(\psi_1, \psi_2, \psi_3)$  は  $R'$  内のYaw-Pitch-Roll角を表す。

【0101】カメラキャリブレーションでは、 $g = (\beta_s, \beta_t, s_0, t_0, a_1, b_1, b_2, b_3, b_4)$  をカメラ内部パラメータ、 $h = (\psi_1, \psi_2, \psi_3, t'_1, t'_2, t'_3)$  をカメラ外部パラメータと呼ぶ。

【0102】いま世界座標系で与えられた3次元点群

$(x_{pi}, y_{pi}, z_{pi})$  と対応する画像点  $(s_i, t_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) が与えられたとき、パラメータ  $g = (\beta_s, \beta_t, s_0, t_0, a_1, b_1, b_2, b_3, b_4)$  と  $h = (\psi_1, \psi_2, \psi_3, t'_1, t'_2, t'_3)$  を算出する方法は、先にも述べたように文献1などで与えられる。

【0103】一方、これらのパラメータが算出されると、世界座標系の3次元点  $(x_1, y_1, z_1)$  からテクスチャ撮影用カメラ座標系での対応点  $(s, t)$  を算出するには、以下の方法をとればよい。すなわち、

(1) まず

【0104】

【数23】

$$\begin{aligned}\bar{u} &= \frac{x'_{11}x_W + x'_{12}y_W + x'_{13}z_W + t'_x}{x'_{31}x_W + x'_{32}y_W + x'_{33}z_W + t'_z} \\ \bar{v} &= \frac{x'_{21}x_W + x'_{22}y_W + x'_{23}z_W + t'_y}{x'_{31}x_W + x'_{32}y_W + x'_{33}z_W + t'_z}\end{aligned}\quad (20)$$

を満たす2次元点 $(\bar{u}, \bar{v})$ を計算する。

(2) 続いて

$$\begin{aligned}\bar{u} &= \bar{u} + (b_1 + b_3)\bar{u}^2 + b_4\bar{u}\bar{v} + b_1\bar{v}^2 + a_1\bar{u}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2) \\ \bar{v} &= \bar{v} + b_2\bar{u}^2 + b_3\bar{u}\bar{v} + (b_2 + b_4)\bar{v}^2 + a_1\bar{v}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)\end{aligned}\quad (21)$$

を満たす $(\bar{u}, \bar{v})$ をニュートン法あるいはテーブルを利用して、算出する。

(3) 最後に

$$u = \beta_u \bar{u} + u_0 \quad v = \beta_v \bar{v} + v_0 \quad (22)$$

により、 $(u, v)$ を算出する。

【0105】さて、ステップ4-6では、テキストチャ撮影用カメラで、キャリブレーションパターンを撮影する。その画像においては、背景となる平面部は白く映り、キャリブレーションパターンである穴の部分は白い平面部と識別することが容易である。すなわち、基本的な画像処理アルゴリズムを利用することにより、撮影された画像内から容易に、穴の中心座標を算出することができる。いま、この2次元座標値を $(s_k, t_k)$ とする。ここに $k$ はキャリブレーションボードの位置を表すインデックスであり、 $d$ は認識されたキャリブレーションパターン(穴)を表すインデックスである。こうして

計測された $(s_k, t_k)$ に対応する世界座標系でのキャリブレーションパターン(穴)の位置を $(x_k, y_k, z_k)$ とする。

【0106】一方、ステップ4-10では、ステップ4-6で算出された $(s_k, t_k)$ と対応する $(x_k, y_k, z_k)$ を利用して、先に述べたカメラ内部パラメータ $g = (\beta_s, \beta_t, s_0, t_0, a_1, b_1, b_2, b_3, b_4)$ とカメラ外部パラメータ $h = (\Psi_1, \Psi_2, t'_1, t'_2, t'_3)$ を算出する。

【0107】

【数24】

この後、レンジセンサ座標系から、テクスチャ撮影用カメラ座標系へのパラメータを算出する。これを算出するためには、カメラ外部パラメータ  $h = (\psi_x, \psi_y, \psi_z, t'_x, t'_y, t'_z)$  から、まず世界座標系からテクスチャ撮影用カメラ座標系への座標変換行列  $c_{HW}$  を算出する。

$$\begin{aligned}
 c_{HW} &= \begin{bmatrix} x'_{11} & x'_{12} & x'_{13} & t'_x \\ x'_{21} & x'_{22} & x'_{23} & t'_y \\ x'_{31} & x'_{32} & x'_{33} & t'_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \text{trans}(t'_x, t'_y, t'_z) \text{Rot}(z, \psi_z) \text{Rot}(y, \psi_y) \text{Rot}(x, \psi_x) \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t'_x \\ 0 & 1 & 0 & t'_y \\ 0 & 0 & 1 & t'_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi_z & -\sin \psi_z & 0 & 0 \\ \sin \psi_z & \cos \psi_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\quad \begin{bmatrix} \cos \psi_y & 0 & \sin \psi_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \psi_y & 0 & \cos \psi_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi_x & -\sin \psi_x & 0 \\ 0 & \sin \psi_x & \cos \psi_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\quad (23)
 \end{aligned}$$

で与えられる。一方、世界座標系Wからレンジセンサ座標系への座標変換行列  $R_{HW}$  は

【0108】

【数25】

$$\begin{aligned}
 R_{HW} &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \text{trans}(t_x, t_y, t_z) \text{Rot}(z, \phi_z) \text{Rot}(y, \phi_y) \text{Rot}(x, \phi_x) \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_z & -\sin \phi_z & 0 & 0 \\ \sin \phi_z & \cos \phi_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\quad \begin{bmatrix} \cos \phi_y & 0 & \sin \phi_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \phi_y & 0 & \cos \phi_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_x & -\sin \phi_x & 0 \\ 0 & \sin \phi_x & \cos \phi_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\quad (24)
 \end{aligned}$$

【0109】で与えられる。よって、レンジセンサ1からテクスチャ撮影用カメラ座標系への座標変換行列は、

【0110】

【数26】

$$c_{HR} = c_{HW} w_{HR} = c_{HW} (c_{HR})^{-1} \quad (25)$$

【0111】によって算出することができる。この座標

きる。

変換行列により、レンジセンサ座標系の点  $(x_R,$

【0112】

$y_R, z_R)$  をテクスチャ撮影用カメラ座標系の点  $(x$

【数27】

$c, y_c, z_c)$  に、以下の式により変換することがで

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = c_{HR} \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R'' & T'' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \\ 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

【0113】とする。ここで、 $R''$  と  $T''$  は、レンジセンサ座標系からテクスチャ撮影用カメラ座標系への座標変換のうちの回転行列と並進ベクトルの成分を表す。

【0114】以下では、こうして算出されたパラメータからどのようにテクスチャ画像と距離画像とを融合するかを図18と図19を利用して簡単に説明する。



【0115】まず図18を参照しながら説明する。いまレンジセンサ1内のセンサ素子28 (i, j) で計測されたfに基づき、先に述べたように、ルックアップテー

ブル処理を施すことを行い、すなわち

【0116】

【数28】

a)  $f^m \leq f \leq f^{m+1}$  をみたすmを見つける。

$$b) z_R = \frac{(f^{m+1} - f) z_R^m + (f - f^m) z_R^{m+1}}{f^{m+1} - f^m}$$

$$c) \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u} z_R \\ \tilde{v} z_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 - u_0}{\alpha_u} z_R \\ \frac{j - v_0}{\alpha_v} z_R \\ z_R \end{bmatrix} \quad (27)$$

【0117】により、レンジセンサ座標系における3次元計測点  $(x_R, y_R, z_R)$  を算出する。これらすべての3次元計測点29を  $(x_{R^a}, y_{R^a}, z_{R^a})$  とする。ここで  $a=1, 2, \dots, N$  とする。これらの点は、レンジセンサ座標系からテクスチャ撮影用カメラ座標系への

座標変換パラメータ  $(R'', T'')$  を利用して、テクスチャ撮影用カメラ座標系の点  $(x_c, y_c, z_c)$  へ、以下の式によりマッピングされる。

【0118】

【数29】

$$\begin{bmatrix} x_c^a \\ y_c^a \\ z_c^a \end{bmatrix} = R'' \begin{bmatrix} x_R^a \\ y_R^a \\ z_R^a \end{bmatrix} + T'' \quad (28)$$

【0119】続いて、テクスチャ撮影用カメラの先に述べたカメラ内部パラメータ  $g = (\beta_s, \beta_t, s_0, t_0, a_1, b_1, b_2, b_3, b_4)$  と式(20)(21)(22)を利用して、 $(x_c, y_c, z_c)$  に対するカメラ画像内の対応点30  $(s_a, t_a)$  を算出する。こうして、カメラ画像内での離散的な画像計測点と測距点の組  $\{(s_a, t_a), (x_c, y_c, z_c)\}$  を利用して、テクスチャマッピングを行う。

$$n_1 x_c + n_1 y_c + n_1 z_c = d$$

とする。この平面  $\pi_{32}$  と、カメラ画素点  $(k, m)$  が作る光線との交点33を以て、 $(k, m)$  に対する測距点と新たに定義すればよい。具体的には、

【0120】具体的には、次のような方法がある。図19を参照しながら説明する。テクスチャ撮影用カメラの各画素  $(k, m)$  について、最近傍の画像計測点3点  $(s_b, t_b)$  34 ( $b=1, 2, 3$ ) を探索し、その測定点  $(x_b, y_b, z_b)$  31を探索する。このとき、それら測距点を作る平面を  $\pi_{32}$  とする。いまこの平面を

(29)

【0121】

【数30】

$$\hat{a} = \frac{\kappa - a_0}{\beta_g} \quad \hat{c} = \frac{m - c_0}{\beta_t} \quad (30)$$

から、正規化されたカメラ画像座標値34 ( $\hat{a}, \hat{c}$ ) をまず算出し、続いて、レンズディストーションを含めたカメラ座標値 ( $\bar{a}, \bar{c}$ ) を式(19)により算出する。このとき、( $a_t, c_t$ ) を通る光線を示す直線上の点 ( $x_c, y_c, z_c$ ) は、 $z_c$  をパラメータとして、

$$\begin{aligned} x_c &= \bar{a} z_c \\ y_c &= \bar{c} z_c \\ z_c &= z_c \end{aligned} \quad (31)$$

と書くことができるので、この直線と平面 $\pi$ との交点を求めればよい。  
すなわち、

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{d\bar{a}}{n_x\bar{a} + n_y\bar{c} + n_z}, \quad y_c = \frac{d\bar{c}}{n_x\bar{a} + n_y\bar{c} + n_z}, \\ z_c &= \frac{d}{n_x\bar{a} + n_y\bar{c} + n_z} \end{aligned} \quad (32)$$

【0122】で求めることができる。すなわち、テキスト撮影用カメラの各画素点について、距離情報 ( $x_c, y_c, z_c$ ) を付加することができるので、テキストチャマッピング、あるいは距離画像とテキストチャ画像に融合をしたことと等価になる。

【0123】以上説明してきたように、第3実施形態によれば、テキストチャ画像等を撮影するカメラや撮影装置を、レンジセンサ1の他に配置し、キャリブレーションパターンを同時に認識することで、両者の間の位置関係を計測することが可能となり、レンジセンサ1が生成した距離画像とテキストチャ画像を融合することが可能となる。

#### 【0124】

【発明の効果】請求項1に記載の発明によれば、各素子が規定する光線パラメータを算出することにより、レンジセンサの光学系が有する歪み成分(レンズディストーション)を有している場合でも、正確にキャリブレーションを行うことができる。また各素子について光線パラメータと距離パラメータを算出するので、複数の素子間に現れるタイムオブフライトの特性のばらつきを補正することもできる。

【0125】また、請求項2に記載の発明によれば、請求項1に記載の発明の効果に加えて、3次元的に形状が既知な部材をリファレンスとして利用できるので、キャリブレーション時に測定すべきパラメータの算出が容易になる。これによって素子全体が算出する対象物の3次元形状を、相対的ではない絶対的な意味での座標値を用いて計測することができ、正確な3次元計測が可能となる。

【0126】また、請求項3に記載の発明によれば、請求項2に記載の発明の効果に加えて、複数回撮影することにより、キャリブレーションに使用するパラメータの算出が容易になる。

【0127】また、請求項4に記載の発明によれば、請求項3に記載の発明の効果に加えて、キャリブレーションに使用するパターンの認識(穴などのマーカの認識)が容易になるので、人手の介入を少なくし、より正確で容易なキャリブレーションが実現できる。

【0128】また、請求項5に記載の発明によれば、請求項1に記載の発明の効果に加えて、変換テーブルを利用することにより、キャリブレーションパラメータを効率的に格納し、かつ距離変換に利用することができる。

【0129】また、請求項6に記載の発明によれば、請求項1に記載の発明の効果に加えて、テキストチャ画像などを撮影するカメラや撮影装置を、レンジセンサの他に配置し、キャリブレーションパターンを同時に認識することで、両者の間の位置関係を計測することが可能となり、レンジセンサが生成した距離画像とテキストチャ画像を融合することが可能となる。

【0130】また、請求項7に記載の発明によれば、請求項2に記載の発明の効果に加えて、3次元形状な部材を3次元的に移動することにより、光線パラメータと距離パラメータを同時に推定することが可能である。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1実施形態に関わるレンジセンサ1の装置構成の一部を示す図である。

【図2】センサ素子アレイ7の構造を数学的に示した図である。

【図3】レンジセンサ1がどのようにして距離画像を生成できるかについて説明するための図である。

【図4】測定点列( $f_{ij}$ ,  $z_{ij}$ )に対するルックアップテーブルの内部構成を示す図である。

【図5】キャリブレーション方法を具体化するアルゴリズムを示すフローチャートである。

【図6】光線パラメータと座標変換パラメータを算出する方法を実現する装置を示す図である。

【図7】キャリブレーションボードの構成を示す図である。

【図8】光線パラメータを算出するためのアルゴリズムを示す図である。

【図9】ステップ2である距離パラメータの算出とルックアップテーブルの作成に関する装置を示す図である。

【図10】ステップ2のアルゴリズムの詳細を示すフローチャートである。

【図11】( $f_{ij}$ ,  $z_{ij}$ )のテーブルを示す図である。

【図12】キャリブレーションボード内のパターンの大きさと間隔を $z$ の位置に応じて変化させた構成を示す図である。

【図13】本発明の第2の実施形態を実現する装置構成を示す図である。

【図14】第2実施形態のアルゴリズムのステップを示すフローチャートである。

【図15】キャリブレーションボードの代わりに、3次元形状が既知な部材を用いた場合の実施形態を説明するための図である。

【図16】本発明の第3実施形態の構成を示す図である。

【図17】第3実施形態の処理フローを示すフローチャートである。

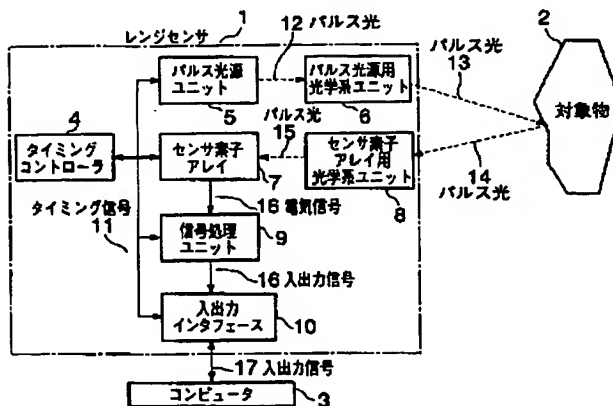
【図18】算出されたパラメータからテクスチャ画像と距離画像とをどのように融合するかを説明するための図(その1)である。

【図19】算出されたパラメータからテクスチャ画像と距離画像とをどのように融合するかを説明するための図(その2)である。

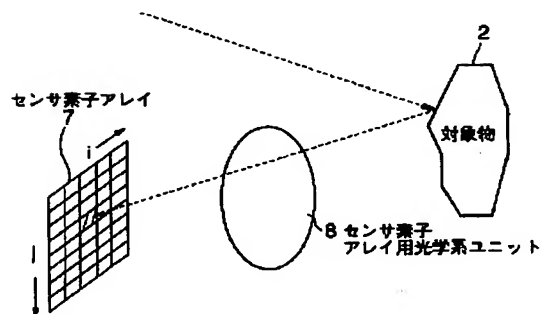
【符号の説明】

- 1 レンジセンサ
- 2 対象物
- 3 コンピュータ
- 4 タイミングコントローラ
- 5 パルス光源ユニット
- 6 パルス光源用光学系ユニット
- 7 センサ素子アレイ
- 8 センサ素子アレイ用光学系ユニット
- 9 信号処理ユニット
- 10 入出力インタフェース
- 11 タイミング信号
- 12 パルス光
- 13 パルス光
- 14 パルス光
- 15 パルス光
- 16 入出力信号
- 17 入出力信号

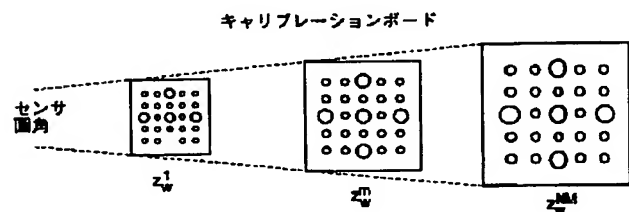
【図1】



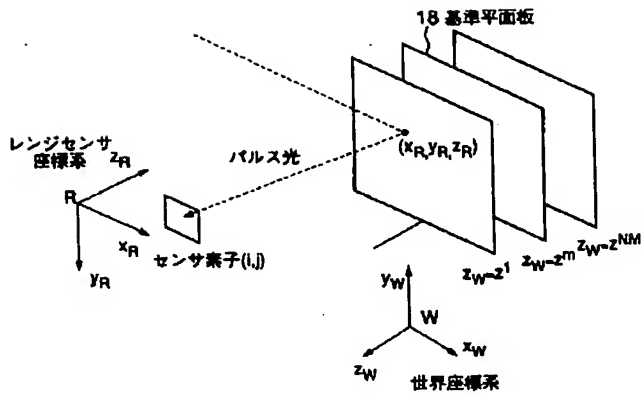
【図2】



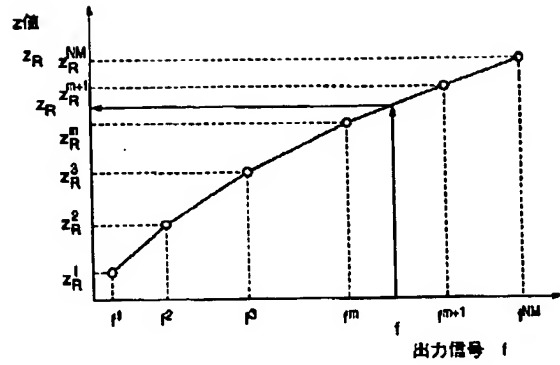
【図12】



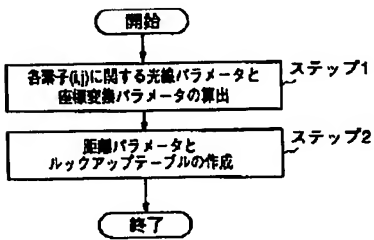
【図3】



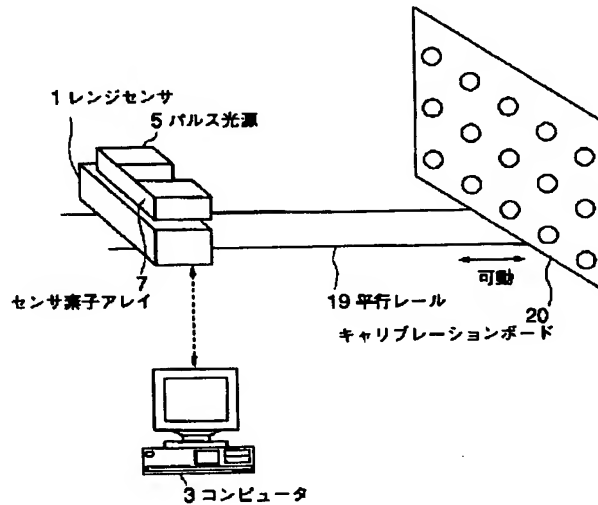
【図4】



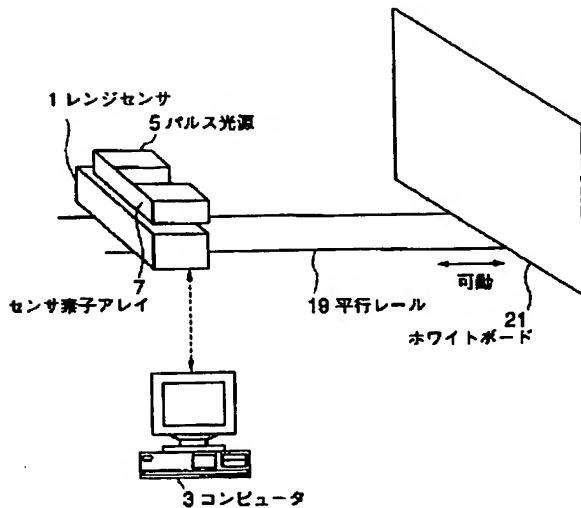
【図5】



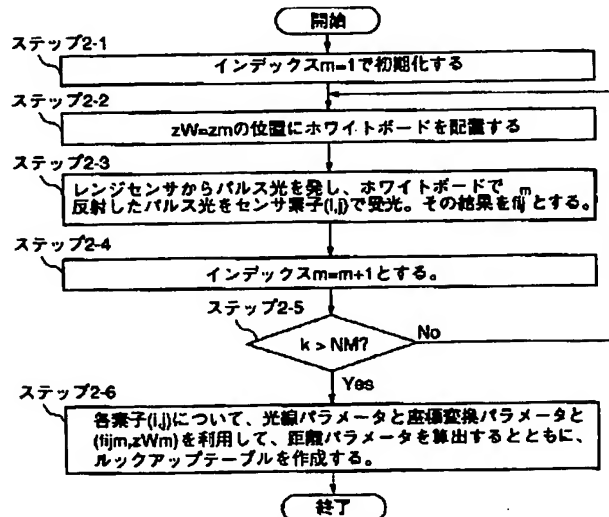
【図6】



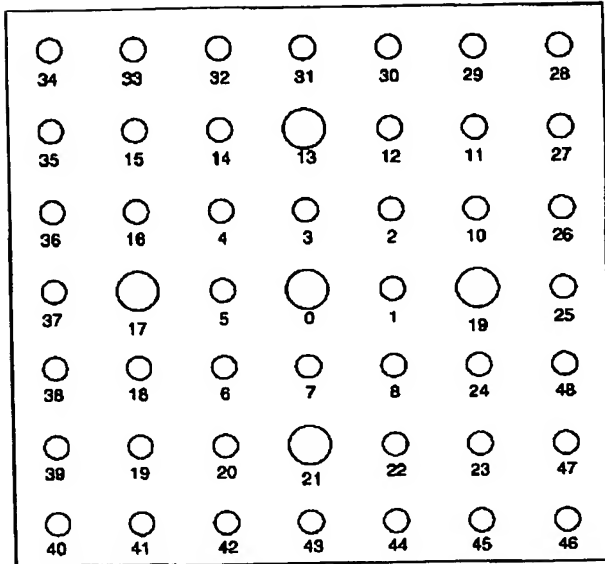
【図9】



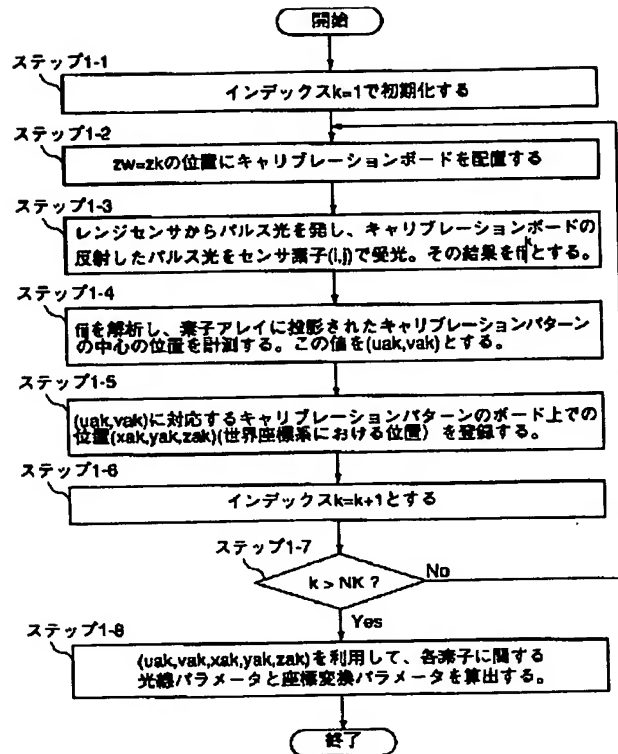
【図10】



【図7】



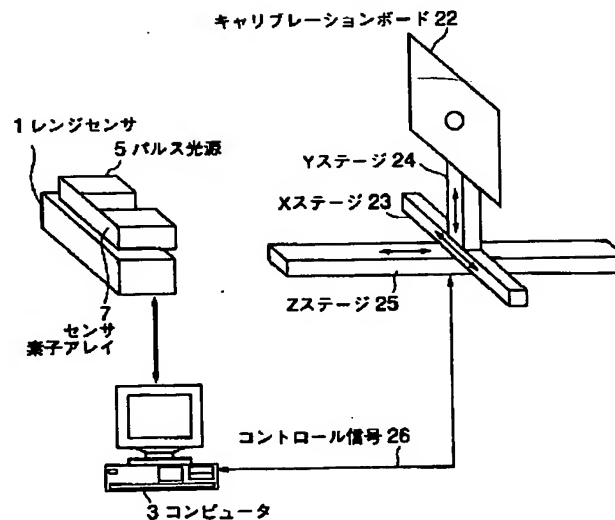
【図8】



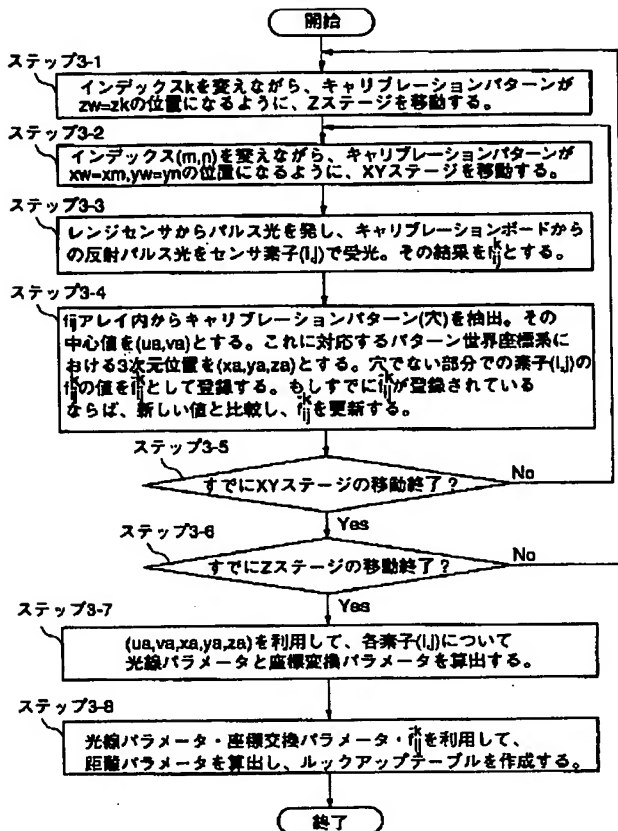
【図11】

インデックス	$z_R$	$f_i$
1	$z_R^1$	$f_i^1$
2	$z_R^2$	$f_i^2$
...	...	...
m	$z_R^m$	$f_i^m$
...	...	...
$N_M$	$z_R^{NM}$	$f_i^{NM}$

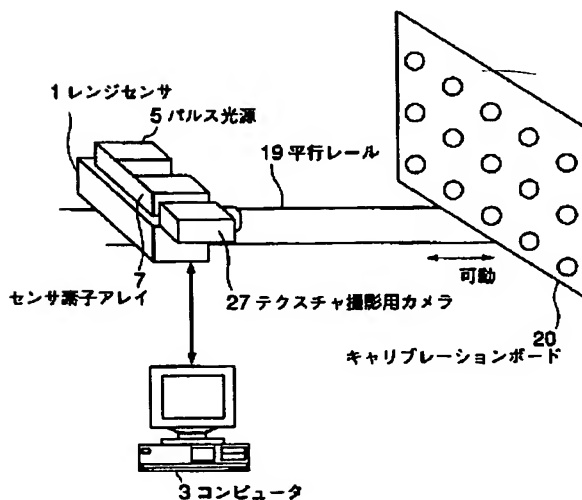
【図13】



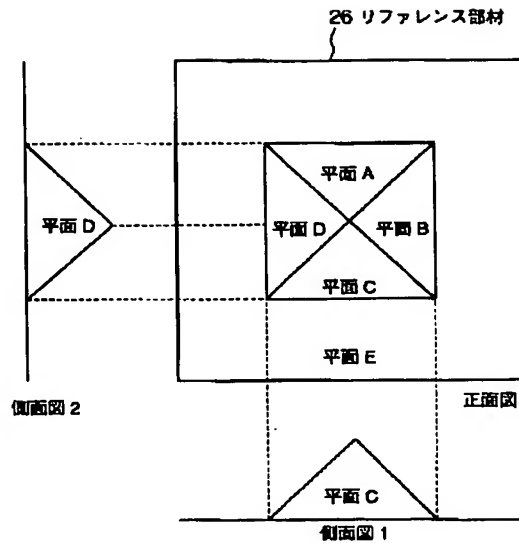
【図14】



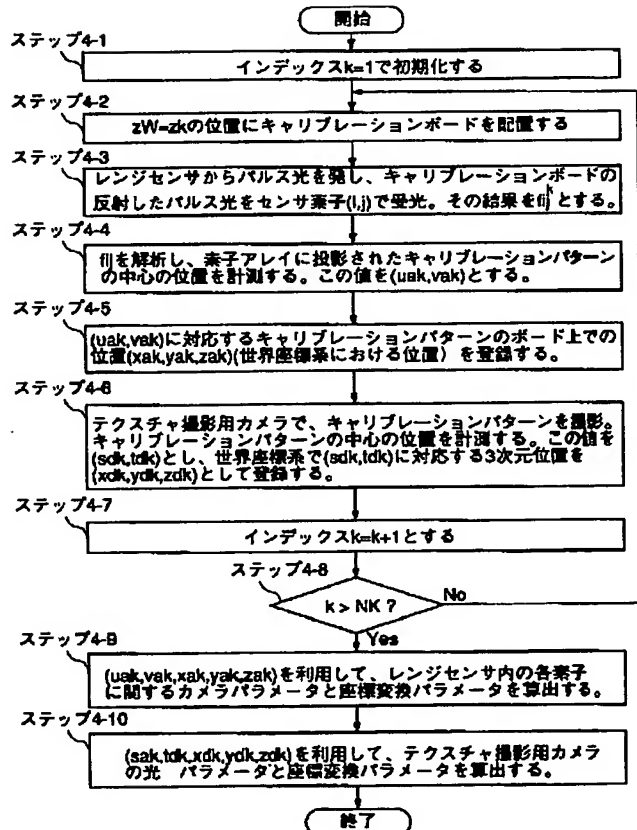
【図16】



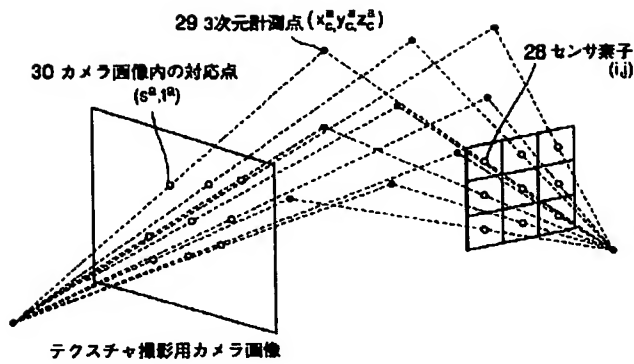
【図15】



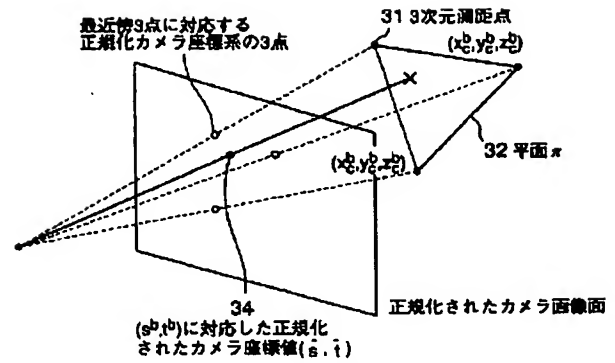
【図17】



【図18】



【図19】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2F065 AA06 BB28 DD00 FF12 FF32  
 FF61 JJ03 JJ09 JJ26 PP12  
 RR07 SS03 SS13 UU04 UU05  
 2F112 AD01 BA06 CA08 FA03 FA45  
 GA10  
 5B057 BA02 BA17 BA19 BA26 CA12  
 CA16 CD14 CH07 DA07 DA20  
 DB02 DC39  
 5J084 AA05 AB20 AD01 BA40 CA03  
 CA31 CA67 DA01 DA07 EA08  
 FA03